

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**НОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ****УСИЛЕНИЕ ТОКОВ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ
КРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ ГЕРМАНИЕВЫМИ ТРИОДАМИ****В. С. Вавилов****1. ВВЕДЕНИЕ**

Кристаллический германиевый триод, известный под названием «транзистора», несомненно, заслуживает большого внимания и будет предметом систематического изучения и усовершенствования. Первые сообщения о возможности усиления переменных токов с помощью этого устройства появились в начале 1948 г.^{1,2} Идея генерации и усиления радиосигналов в устройстве, во многом похожем на широко известные кристаллические детекторы, не является новой. Советскому физiku О. В. Лосеву уже в 20-х годах, т. е. до начала массового применения вакуумных триодов, удалось построить усилительную схему, названную им «кристадином» и дававшую возможность генерировать радиочастотные колебания (см., например, 3, 4, 5).

Однако в связи с переходом на ламповые схемы, идея эта не получила должного распространения.

Развитие радиолокации и переход на сантиметровые волны заставили вновь взяться за изучение и усовершенствование кристаллических детекторов, которым не свойственно ограничение частот временем пролёта электронов и ёмкость которых очень мала. В настоящее время кристаллический детектор — почти обязательный элемент микроволнового приёмника.

Технические успехи, достигнутые⁶ в области конструирования таких детекторов, весьма велики. Во многом это обусловлено развитием учения о полупроводниках, где отечественной физике по праву должно быть отведено первое место, которым мы во многом обязаны работам А. Ф. Иоффе и его школы (см., например, 7).

Возможность применения схемы, изображённой на рис. 1, для усиления сигналов была открыта при изучении действия электрического поля в электролите на вольтамперную характеристику погружённого в электролит германиевого детектора с высоким обратным напряжением. Как будет указано ниже, кроме схемы рис. 1, для усиления сигналов могут быть использованы и другие способы включения кристаллического триода.

Вскоре после обнаружения свойств кристаллического триода ему удалось придать достаточно удобную для практического применения форму. Основными преимуществами кристаллического триода является

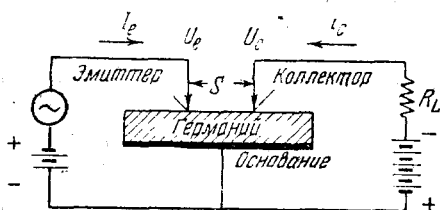


Рис. 1. Схема включения кристаллического триода.

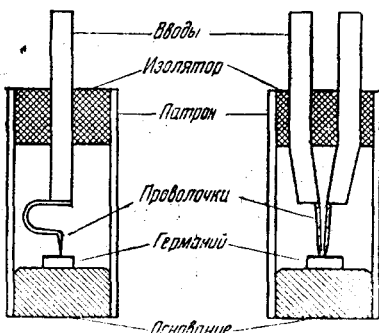


Рис. 2. Устройство транзистора.

отсутствие вакуума и необходимости в источнике энергии для нити накаливания катода. Вес усилительной «единицы» (рис. 2 и 5) вместе с защитным патроном—около 1,3 г. Существенными недостатками в его сегодняшней стадии развития является уровень шума более высокий, чем в радиолампах, малая мощность (5—20 *мвт*) на выходе*) и неудобство согласования нескольких элементов в многокаскадный усилитель из-за большой разницы между оптимальными входным и выходным сопротивлениями. Область рабочих частот, очевидно, не сможет быть расширена за границу примерно 10 *Мгц* вследствие ограничений, налагаемых подвижностью носителей проводимости полупроводника.

Перед тем как перейти к более детальному изложению, нам кажется целесообразным привести краткую сводку наиболее характерных особенностей германия ввиду того, что этот элемент до самого последнего времени не имел сколько-нибудь широкого применения в технике и не изучался детально (см. табл. I и II).

Необходимые сведения из теории электропроводности полупроводников можно найти, например, в обзоре Ф. Ф. Волькенштейна в УФН⁸. Более широко теория зон развита в^{9, 10}.

*) Согласно⁸⁹, видоизменением конструкции удалось повысить полезную мощность по крайней мере в 5—10 раз.

2. О СВОЙСТВАХ ГЕРМАНИЯ

Существование германия было предсказано Д. И. Менделеевым, указавшим на свойства, которыми должен был обладать этот элемент, названный им экасилицием.

Во многом германий близко напоминает углерод, кремний и олово. Это видно из приводимой таблицы I.

Таблица I

Сравнение некоторых свойств углерода, кремния, германия и олова

	Углерод	Кремний	Германий	Олово
Кристаллическая решётка	Кубическая (алмаз) Гексагональная (графит)	«Алмазная» Гексагональная	«Алмазная»	«Алмазная» (серое олово) Тетрагональная Ромбическая
Точка плавления °C	3500	1420	958	231,9
Точка кипения °C	4200 (?)	2600	≈ 2700	2270
Плотность г/см³	3,51	2,4	5,35	5,75
Внешний вид	Прозрачный кристалл	Тёмный металлический блеск	Яркий металлический блеск	Яркий металлический блеск
Удельное сопротивление при 25° C	> 10 ⁶ ом см (сильно меняется)	от 0,001 до 1 ом см	от 0,001 до 50 ом см	Металл
Тип электропроводности	Диэлектрик	Полупроводник	Полупроводник	Металл
Приводятся данные «алмазных» кубических модификаций, кроме олова, где этот вид решётки устойчив при температурах ниже —18° C.				

Химически германий очень близок к углероду и кремнию и, подобно этим элементам, может образовывать длинные цепи гидридов и другие соединения, аналогичные органическим¹¹.

Метод выделения германия обычно состоит в восстановлении окиси его в водороде при температуре около 600°C . Окись германия добывается из остатков цинковых руд. В малых количествах германий получался также при разложении некоторых летучих соединений, например GeCl_4 . Порошок германия, получаемый восстановлением окиси, сплавляется в слиток. Свойства кристаллического германия, приготовленного таким образом, в сильной степени зависят от атмосферы, в которой плавился германий, и термической обработки. Обычно плавка ведётся в сухом азоте, водороде, гелии или в вакууме. Во всех случаях присутствие водяных паров повышает сопротивление германия, что невыгодно для устройства транзисторов¹².

Удельное сопротивление германия при комнатной температуре колеблется от $50 \text{ ом}\cdot\text{см}$. до $0,001 \text{ ом}\cdot\text{см}$, в зависимости от концентрации и типа примесей. Чувствительность германия к примесям такова, что один атом примеси на 10^8 — 10^9 атомов Ge заметно влияет на электрические свойства. Алюминий, олово, мышьяк и галлий, очевидно, способны значительно понижать сопротивление германия.

Одной из интересных особенностей германия является его высокий коэффициент отражения — в этом отношении германий похож на металл. Отражение достигает 50%. Это свойство является аномальным. Как известно, «металлический блеск» обычно связывается с наличием свободных электронов и высокой электропроводностью.

Германий, имеющий плотность свободных электронов, примерно в миллион раз меньшую, чем алюминий или серебро, отражает свет почти так же, как эти металлы. Очевидно, значительная часть электронов германия, связанных настолько сильно, что он не является проводником, возбуждается всё же падающим светом и участвует в отражении.

Механически германий очень твёрд и хрупок.

Кроме значительной зависимости проводимости от примесей, упомянутой выше, германий в отличие от многих других полупроводников имеет заметную проводимость при обычной температуре, не связанную с наличием примесей. Эта собственная проводимость может быть выделена по ходу температурной зависимости полной проводимости и соответствует примерно $100 \text{ ом}\cdot\text{см}$ ¹⁰.

Собственная полупроводимость вещества имеет место в случае, когда энергетический «промежуток» между верхней заполненной зоной и нижней частью более высоко расположенной свободной зоны мал. При абсолютном нуле такое вещество было бы диэлектриком, но при более высоких температурах некоторое количество электронов «забрасывается» в свободную зону, что ведёт к появлению проводимости. Для свойств германия как детектора эта проводимость, повидимому, не существенна.

Привнесённая «примесная» полупроводимость возникает вследствие присутствия добавочных энергетических уровней, в результате несовершенств (нарушений) решётки или наличия атомов примеси. Эти уровни лежат в нормально запрещённой области между заполненной и свободной зоной и могут являться «донорами» или «акцепторами». Первые отдают электрон, уходящий в свобод-

Таблица II
Основные свойства германия¹⁰

Атомный вес	72,60
Атомный номер	32
Атомный радиус	1,22 Å
Сжимаемость	$1,4 \cdot 10^{12} \frac{\text{дин}}{\text{см}^2}$
Удельное сопротивление	от 0,001 до 50 ом·см
Коэффициент Холла	от $100 \cdot 10^{-9}$ до $800\,000 \cdot 10^{-9} \frac{\text{в.с.м}}{\text{а.гаусс}}$
Коэффициент отражения	≈ 50%
Подвижность электронов при 25° С	$< 3000 \frac{\text{см}^2}{\text{в.сек}}$ (максимум)
Магнитная восприимчивость . .	$0,12 \cdot 10^{-6}$ CGSM
Теплоёмкость	$0,072 \frac{\text{кал}}{\text{г.градус } ^\circ\text{С}}$
Характеристическая температура	290° К

ную зону. Вторые могут захватывать электрон из близко лежащего верхнего края заполненной зоны, оставляя в ней незаполненный уровень.

В германии примеси обычно являются донорами, обуславливая *n*-проводимость. Ширина запрещённой области порядка 0,75 эв, причём уровни примесей лежат весьма близко к краю заполненной зоны ($\Delta E < 0,1$ эв).

Диаграмма энергетических уровней, указывающая допустимые уровни валентных электронов в полупроводнике, подобном германию, изображена на рис. 3. Непрерывная зона снизу нормально заполнена связанными электронами. В промежутке E_g нет уровней, соответствующих решётке идеального кристалла. Верхняя зона — зона проводимости — нормально не занята. Числа уровней заполненной зоны хватает как раз на размещение валентных электронов. Локальные уровни примеси — акцепторы, лежащие вблизи и над заполненной зоной, и уровни — доноры, лежащие под зоной про-

водимости, вблизи неё, соответствуют электронам, локализованным у атомов примеси. Доноры нормально нейтральны, но при переходе их электрона (возбуждении) в зону проводимости приобретают положительный заряд. На это расходуется энергия ΔE . Нормально нейтральные акцепторы ионизируются отрицательно при возбуждении электрона нейтральной зоны. В германии ΔE_D и ΔE_A настолько малы, что практически все доноры и акцепторы ионизованы при «комнатной» температуре.

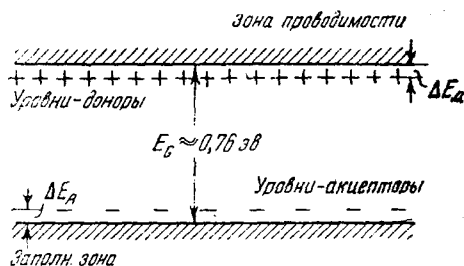


Рис. 3.

Так же, как и «внесённая» проводимость, собственная проводимость германия зависит от температуры. При низких ($< 300^\circ \text{K}$) температурах она составляет лишь небольшую долю

полной проводимости. При достаточно высоких температурах для хорошо очищенного германия ($\rho = 10 \text{ ом} \cdot \text{см}$ или выше) преобладает собственная проводимость, растущая с температурой. Комбинация двух типов проводимости приводит к кривой, типа изображённой на рис. 4.

Изучение эффекта Холла показывает, что изменение удельного сопротивления ρ при низких температурах обусловлено изменением среднего свободного пробега носителей тока; «собственная» же проводимость меняется в основном вследствие термического возбуждения атомных электронов.

Как известно, эффект Холла заключается в появлении «поперечной» разности потенциалов на провод-

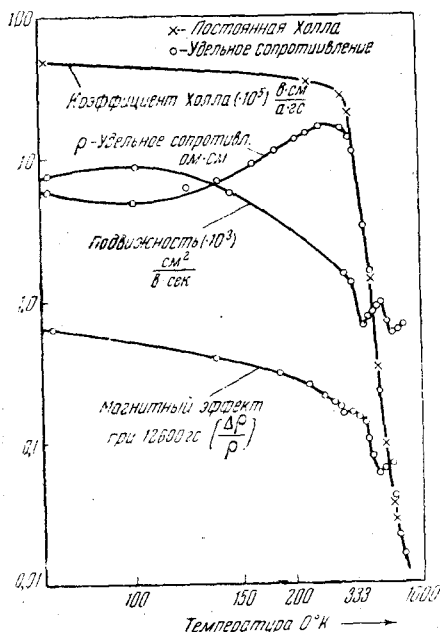


Рис. 4. Зависимость некоторых свойств германия от температуры.

нике с током при условии, что проводник находится в магнитном поле, перпендикулярном к направлению тока и «лицевой» стороне проводника.

Разность потенциалов U определяется из уравнения

$$U = R \frac{HI}{t}, \quad (1)$$

где R — коэффициент Холла данного вещества, I — сила тока, H — напряжённость магнитного поля и t — толщина исследуемого образца в направлении магнитного поля. Исследуя эффект Холла, удаётся определять тип и число носителей проводимости; если известно сопротивление вещества, то может быть вычислена также подвижность носителей проводимости и средний свободный пробег. Зависимость коэффициента Холла от T показана на рис. 4. Там, где он не меняется, число свободных электронов постоянно, как это имеет место в области «примесной» проводимости (см., например, ⁷). В области собственной проводимости R изменяется так же, как удельное сопротивление ρ . Говоря об измерениях эффекта Холла, следует заметить, что однозначные следствия из них (например, число носителей проводимости) могут быть получены лишь, если вся проводимость (примесная) обусловлена либо только электронами, либо только «дырками» ¹³.

Измерения подвижности носителей проводимости в германии ($\frac{R}{\rho}$) показали, что электроны (n -проводимость) более подвижны, чем «дырки» (p -проводимость). Подвижность электронов в германии выше, чем во всех других твёрдых проводниках, может быть, за исключением висмута ^{11, 12}. Подвижность электронов при обычных — порядка 300° К — температурах доходит до 3000 см²/в сек, в то время как для других полупроводников и металлов имеют место подвижности порядка 20 — 100 см²/в сек ^{14, 28}.

Исследования эффекта Холла в германии показывают, что в зависимости от взятого образца в нём может иметь место или электронная, или дырочная проводимость.

На рис. 4 отображено и другое интересное свойство германия — сильная зависимость удельного сопротивления от напряжённости магнитного поля. Этот эффект называется тем сильнее, чем меньше проводимость германия. Кривая показывает изменение этого эффекта при $H = 12\,600$ эрстед с температурой (по ординате отложена величина $\frac{\Delta\rho}{\rho_0}$ в логарифмическом масштабе).

3. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ТРИОДА

На рис. 1 схематически изображён транзистор в той форме, в которой он был осуществлён Бардином и Браттэйном. Два точечных контакта — острые концы проволочек — соприкасаются с верхней плоскостью небольшой пластинки германия. Расстояние между ними очень мало ($\approx 0,005 — 0,025$ см). Один из контактов,

на который подаётся небольшое положительное напряжение, назван авторами «эмиттером» и по своему назначению соответствует управляющей сетке триода. Второй контакт, аналогичный «аноду» триода (напоминаем, что здесь имеет место лишь формальная аналогия), именуется коллектором. Нижняя поверхность пластинки германия металлизирована. Таким образом, с этой стороны контакт имеет большую площадь и соответственно малое сопротивление¹⁴. На рис. 5 изображена модель «коаксиального» транзистора¹⁵, в настоящее время изготавливаемого серийно.

Гермакий, применённый для кристаллических триодов, относится к полупроводникам с электронной примесной проводимостью и имеет удельное сопротивление порядка 10 ом·см. Поверхность

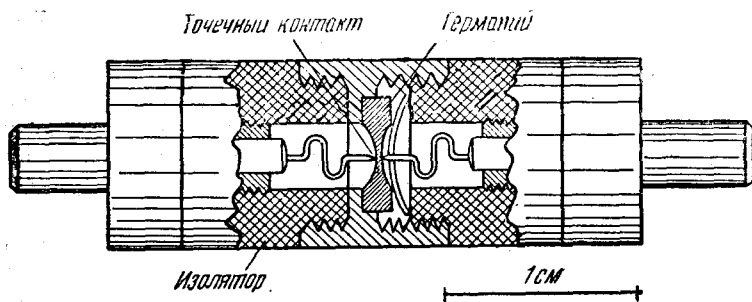


Рис. 5. Коаксиальный транзистор.

пластинки, вырезаемой из слитка алмазной фрезой, подготавливается так же, как для изготовления детекторов с высоким обратным напряжением, т. е. полируется и протравливается¹².

Острые контактов в большинстве случаев изготавливаются из фосфористой бронзы, причём концы проволок сошлифовываются в форме клина, после чего подвергаются электролитической шлифовке. Контакт коллектора иногда формовался пропусканием тока порядка 250 ма, что придавало ему большую устойчивость в работе.

Как уже было сказано, эмиттер находится под положительным потенциалом относительно основания. Это — направление пропускания детектора. Ток I_e порядка 1 ма втекает в пластинку. Коллектор находится относительно основания под отрицательным потенциалом, причём $|U_c| > U_e$; направление тока обратно направлению пропускания детектора. Величина I_c достигает нескольких миллиампер. Током в цепи коллектора можно управлять, меняя ток эмиттера. В частности, если менять I_e , изменяя U_e при постоянном U_c , то изменения тока коллектора I_c могут значительно превосходить изменение I_e . Так как эмиттер представляет собою детектор, работающий в режиме пропускания, небольшого переменного напряжения (и небольшой мощности на входе) достаточно

для изменения тока. Коллектор же, представляющий собой запертый кристаллический детектор с высоким обратным напряжением, может быть согласован с достаточно большим нагрузочным сопротивлением R_L . Переменное напряжение и мощность в цепи нагрузки значительно превышают входные. Усиление по мощности в наиболее благоприятных случаях достигает 100 (т. е. 20 дб).

Ниже (рис. 6) будут приведены характеристики экспериментального транзистора, показывающие, как вольтамперная характеристика диода коллектора меняется в зависимости от тока эмиттера.

Действие транзистора может быть связано с природой тока, проходящего в германии от эмиттера. Германий транзистора имеет около 10^{14} электронов проводимости на 1 см^3 или около одного электрона на 10^8 атомов. Усиление кристаллического триода, очевидно, объясняется тем, что ток эмиттера идёт главным образом за счёт p -проводимости, т. е. переносится носителями обратного знака по отношению к обычно имеющимся в германии в избытке. На коллектор подаётся значительный отрицательный потенциал. Ток, протекающий в пластинке к острию коллектора, обуславливает электрическое поле, притягивающее «дырки», идущие в германий от эмиттера. Если эмиттер и коллектор расположены очень близко друг от друга, значительная часть «дырочного» тока эмиттера пойдёт в коллектор и его цепь. Коллекторный контакт представляет собою барьер высокого сопротивления для электронов, выходящих из металла в полупроводник, но оказывает мало препятствий «дыркам», втекающим в контакт из полупроводника.

Однако это представление позволяет объяснить лишь изменение в токе коллектора порядка I_e и не объясняет наблюдавшихся более значительных изменений. Более значительные изменения I_c , вероятно, являются результатом изменений в пространственном заряде запирающего слоя в германии у контакта коллектора за счёт «дырочного» тока.

Можно считать, что дырочный ток эмиттера меняет вид вольт-амперной характеристики коллектора (см. ниже рис. 6).

Бардин считает, что выпрямляющие свойства германиевого детектора обуславливаются внутренним запирающим барьером, возникающим у свободной поверхности и не зависящим от металлического контакта¹⁶. Барьер этот вблизи поверхности включает в себя весьма тонкую, порядка 10^{-5} см , область p -проводимости. В связи с высказанными выше предположениями о механизме действия транзистора было бы очень важно выяснить, достаточно ли плотность «дырок» в этой области для значительной поверхностной проводимости.

Первые опыты с транзисторами, в которых поверхность германия предварительно окислялась (затем слой окиси смывался и не играл роли в работе триода), указывали на наличие, правда, незначительной поверхностной проводимости порядка $0,0005—0,002 \text{ ом}^{-1}$.

Однако и не подвергавшиеся окислению поверхности, не дававшие заметной поверхностной проводимости, как оказалось, вполне пригодны для транзистора.

Дальнейшие опыты показали, что усиление может быть также получено, например, в коаксиальном устройстве (рис. 5), где не может быть сомнений в том, что «дырки» проходят сквозь слой германия типа «*n*» от эмиттера к коллектору^{15, 17}. Один из убедительных опытов, показывающих, что «дырки» переносятся непосредственно в толще германия, был проделан Хейнсом¹⁸. Была изготовлена тонкая, довольно длинная пластинка германия, с двух концов которой были электролитически нанесены электроды большой площади. Эмиттер и коллектор могли располагаться на разном удалении друг от друга с «лицевой» стороны пластинки.

Электрическое поле между этими электродами могло меняться пропусканием токов вдоль пластинки. Импульсный сигнал, подававшийся на эмиттер, обнаруживался в цепи коллектора через некоторый небольшой промежуток времени. По зависимости этого отрезка времени от поля определялись подвижность и знак носителей проводимости. При этом было выяснено, что они заряжены положительно и что подвижность их совпадает с подвижностью «дырок» в толще германия ($1000 \text{ см}^2/\text{в сек.}$).

Этот и другие подобные опыты, вероятно, помогут выяснить причины высокой проводимости германиевых детекторов (диодов) в пропускающем направлении (см., напр.,¹⁹ и ²⁰). Обычно эта проводимость приписывалась влиянию сильного электрического поля вблизи точечного контакта. Авторы транзистора считают, что проводимость эта — следствие впуска «дырок» с контакта в германий, причём это явление имеет причиной не большую напряжённость поля у контакта, а природу запирающего слоя. Опыт, подтверждающий высказанные идеи, был поставлен Шокли и Райдером²¹. Тонкая пластинка германия имела вид клина, на узкий и широкий концы которого были нанесены электроды. При пропускании тока сквозь такой клин напряжённость поля больше у узкого конца. Если положительный потенциал прилагался к узкому концу, наблюдалась повышенная проводимость германия; при приложении положительного потенциала к широкому концу она отсутствовала. «Дырки», входящие в германий с узкого конца клина, понижали сопротивление в части, представлявшей наибольшую долю сопротивления. При прохождении тока в обратную сторону входящие в германий «дырки» попадают в область слабого поля и продолжительность жизни их недостаточна для того, чтобы они дошли до узкого конца и значительно изменили сопротивление.

Обсуждение механизма действия кристаллического триода будет продолжено ниже после введения некоторых величин, отчасти сходных с характеризующими электронные лампы, и описания характеристик.

4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНЗИСТОРА

Статические характеристики транзистора могут быть получены рассмотрением четырёх переменных, за которые можно взять токи эмиттера и коллектора I_e и I_c , и соответствующие напряжения U_e и U_c . Направления токов в германии принимаются за положительные. Разности потенциалов отсчитываются от основания транзистора (см. рис. 1). Таким образом, I_e и U_e при включении согласно первой схеме положительны, I_c и U_c отрицательны.

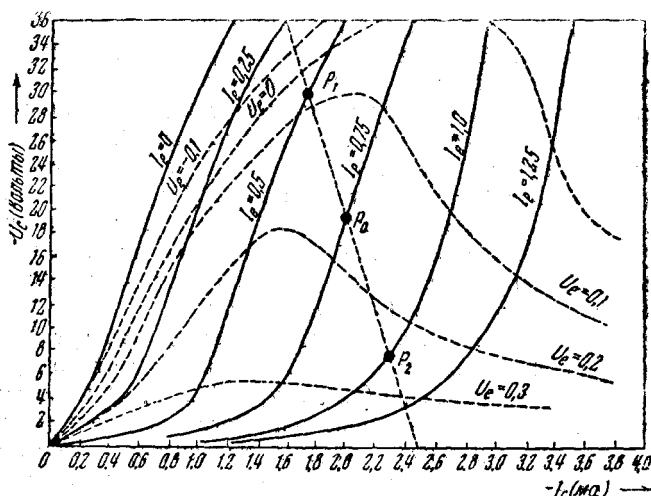


Рис. 6. Характеристики германиевого транзистора.

Между четырьмя переменными существует функциональная зависимость. Любая пара из них может быть принята за независимые переменные. Так как процессы в германии связаны с прохождением и взаимодействием токов, удобнее принять именно токи I_e и I_c за независимые переменные.

Все поля в полупроводнике, вне области пространственного заряда, непосредственно у острия контактов, определяются проходящими токами. Ток эмиттера изменяет вольтамперную характеристику диода коллектора. Разности потенциалов являются однозначными функциями токов, однако ввиду наличия обратной связи токи могут быть двузначными функциями напряжений.

Приводимые на рис. 6 характеристики типичны для опытных образцов кристаллических триодов, изучавшихся Бардином и Браттейном (рис. 2). Контакт коллектора формировался пропусканием сильных токов в обратном направлении, что понижало его обратное (запирающее) сопротивление. Эта обработка, ухудшающая

свойства контакта как детектора, приводила к значительному улучшению работы транзистора¹⁴.

Характеристики, изображённые на рис. 6, наглядно показывают влияние тока эмиттера на вольтамперную характеристику коллектора. Кривая, соответствующая $I_e = 0$, представляет собой обычную обратную характеристику германиевого детектора. С усилением тока эмиттера кривые сдвигаются вправо. Изменение I_c при постоянном U_c превосходит соответствующее изменение I_e . Коэффициент усиления тока α , определяемый как

$$\alpha = - \left(\frac{\partial I_c}{\partial I_e} \right)_{U_c = \text{const}} \quad (2)$$

имеет значение от 2 до 3.

Пунктирные кривые соответствуют постоянным значениям потенциала эмиттера. В правой части U_c падает с ростом I_e , что указывает на отрицательное входное сопротивление. Это объясняется обратным влиянием тока коллектора на характеристику контакта эмиттера.

Ток коллектора I_c снижает потенциал поверхности германия вблизи эмиттера и изменяет эффективное смещение последнего. Можно считать, что это падение потенциала равно $R_F I_c$, где R_F — сопротивление обратной связи, зависящее в свою очередь от токов. Эффективное смещение эмиттера будет равно $U_e - R_F I_c$, и можно записать, что

$$I_e = f(U_e - R_F I_c). \quad (3)$$

В некоторых случаях R_F падает с увеличением I_e вследствие роста проводимости германия вблизи контактов при прохождении токов в прямом направлении. Изменение I_e за счёт зависимости от $(U_e - R_F I_c)$ может привести к ещё большему росту I_c , которое через обратную связь увеличит I_e , т. е. режим станет нестабильным. В этом одна из причин, ограничивающих допустимое усиление кристаллического триода.

На рис. 6 указана нагрузочная линия, соответствующая напряжению питания в цепи коллектора 100 в и нагрузке R_L , равной 40 000 ом. Уравнение этой линии

$$U_c = -100 - 40 \cdot 10^3 I_c. \quad (4)$$

Нагрузка R_L примерно равна сопротивлению коллектора, даваемому наклоном прямолинейных отрезков характеристики. Если рабочий отрезок линии нагрузки заключён между точками P_1 и P_2 , амплитуда напряжения на выходе — порядка 8 в, амплитуда тока — около 0,20 ма. Соответствующие величины на входе транзистора равны 0,07 и 0,18, так что усиление мощности составляет

$$G \approx \frac{8 \cdot 0,20}{0,07 \cdot 0,18} \approx 125. \quad (5)$$

Перейдём к динамическим характеристикам.

В случае малых отклонений от рабочей точки p_0 можно записать:

$$\Delta U_e = R_{11}\Delta I_e + R_{12}\Delta I_c, \quad (6)$$

$$\Delta U_c = R_{21}\Delta I_e + R_{22}\Delta I_c. \quad (7)$$

Токи здесь приняты за независимые переменные. Приращения соответствуют небольшим отклонениям, т. е. сигналу малой амплитуды на входе. Коэффициенты R положительны, имеют размерность сопротивлений и определяются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} R_{11} &= \left(\frac{\partial U_e}{\partial I_e} \right)_{I_c = \text{const}}, \\ R_{12} &= \left(\frac{\partial U_e}{\partial I_c} \right)_{I_e = \text{const}}, \\ R_{21} &= \left(\frac{\partial U_c}{\partial I_e} \right)_{I_c = \text{const}}, \\ R_{22} &= \left(\frac{\partial U_c}{\partial I_c} \right)_{I_e = \text{const}}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Для транзистора, характеристики которого приведены на рис. 3, при $I_e = 0,75 \text{ ма}$ и $I_c = -2 \text{ ма}$ они имеют следующие значения: $R_{11} = 800 \text{ ом}$, $R_{12} = 300 \text{ ом}$, $R_{21} = 100\,000 \text{ ом}$, $R_{22} = 40\,000 \text{ ом}$.

Коэффициент R_{11} представляет собою входное сопротивление при заданном I_c . R_{12} соответствует сопротивлению обратной связи. Отношение $\frac{R_{21}}{R_{22}}$ равно коэффициенту усиления тока α . R_{22} есть сопротивление коллектора, при заданном токе I_e и равно $(10-50) \cdot 10^3 \text{ ом}$, причём меняется с изменением I_e сравнительно мало. Усиление мощности схемой рис. 1 зависит от выбора рабочей точки и нагрузки в цепи коллектора.

Положительная обратная связь, характеризующаяся R_{12} , увеличивает усиление и даёт возможность получать очень большое усиление вблизи порога генерации. Максимальное усиление без учёта обратной связи достигается, когда R_L равно сопротивлению коллектора R_{22} и полное сопротивление (импеданс) генератора равно сопротивлению эмиттера R_{11} . В этом случае

$$G_1 = \alpha^2 \frac{R_{22}}{4R_{11}}. \quad (9)$$

Эта величина равна отношению мощности сигнала, выделяющегося в R_L , к мощности сигнала на входе.

Подставляя приведённые выше коэффициенты R , мы получаем для транзистора, характеристики которого изображены на рис. 4, усиление около 80 (19 дб); разница с приведённым выше значением $G = 125$ объясняется влиянием обратной связи.

5. ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ СИГНАЛА, РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ОСТРИЯМИ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА РАБОТУ ГЕРМАНИЕВОВОГО ТРИОДА. УРОВЕНЬ ШУМОВ

Наибольшая частота сигналов, которые можно усиливать транзистором, доходит, по имеющимся в настоящее время данным²², примерно до 10 Мгц. Рис. 7 показывает изменение коэффициента усиления α с частотой. Заметим, что усиление мощности сигнала имеет место и при $\alpha < 1$ за счёт разницы характеристик диодов эмиттера и коллектора.

Интересно, что в отличие от электронного триода (обычной радиолампы) транзистор не меняет фазу усиливаемого переменного напряжения на 180° . При усилении звуковых частот фаза практически не меняется. В области радиочастот наблюдается растущий с частотой сдвиг фазы усиленного сигнала относительно сигнала на входе (нижние кривые рис. 7). Это явление связано со временем прохождения носителей проводимости в германии, осуществляющих взаимосвязь токов эмиттера и коллектора. Измерения зависимости усиления и сдвига фазы от частоты для коаксиальных триодов¹⁵ с разной толщиной германия между контактами показали, что при больших толщинах α начинает падать при более низких частотах. Сдвиг фазы при одной и той же частоте также растёт с увеличением толщины германия.

Из соображений, приведённых выше, очевидно, что расстояние между остриями электродов должно сильно влиять на работу кристаллического триода.

Как и следовало ожидать, ток эмиттера, с удалением последнего от коллектора, оказывает всё меньшее влияние. R_{21} и α падают с увеличением расстояния s между остриями. Из рис. 8 видно, что α спадает почти экспоненциально при изменении s от 0.005

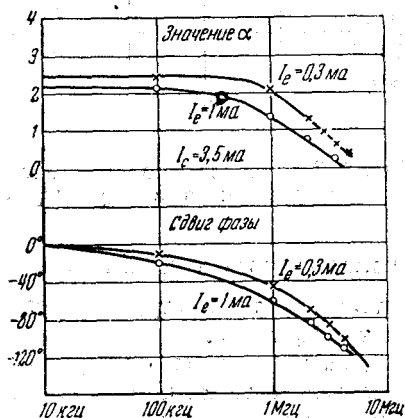


Рис. 7. Частотные характеристики транзистора.

до 0,03 см. Экстраполяция к $s = 0$ показывает, что дальнейшее сближение не увеличило бы α больше чем на 25%.

Об изменении характеристик транзистора с температурой имеются лишь очень немногочисленные данные¹⁴. Известно, что обратная характеристика германиевого диода быстро меняется

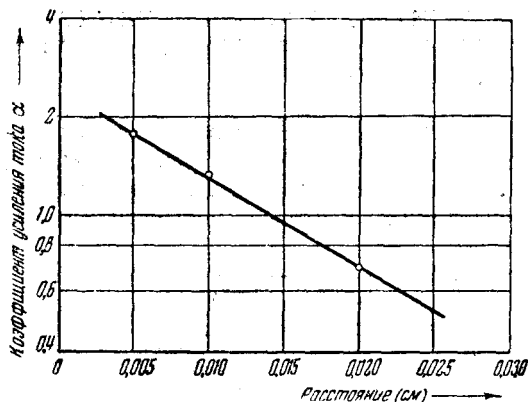


Рис. 8. Зависимость коэффициента усиления от расстояния между острями.

с температурой, причём зависимость тем сильнее, чем выше обратное сопротивление. В транзисторе формовка контакта коллектора приводит к значительному снижению этого сопротивления, и влияние температуры не так сильно. Сопротивление обратной связи R_{12} сравнительно мало зависит от температуры. Коэффициент усиления тока α растёт с температурой. Рост α с температурой может быть

скомпенсирован падением отношения $\frac{R_{22}}{R_{11}}$, что приведёт к отрицательному температурному коэффициенту полного усиления сигнала транзистором.

Для того чтобы охарактеризовать качество транзистора как усилителя с точки зрения возникающих шумов, удобно пользоваться эквивалентной схемой (рис. 9), введённой Беккером²² и аналогичной

широко используемым в радиотехнике эквивалентным схемам. Шумы в усилителе обычно характеризуют числом, равным отношению мощности шумов на выходе к той мощности шумов, которая была бы

измерена, если бы «шумовые генераторы» N_e и N_c эквивалентной схемы отсутствовали и весь шум определялся бы термическим шумом сигнального генератора на входе. Для исследовавшихся Беккером образцов транзисторов при работе на частоте около 1000 гц это число (шумовой фактор) составляло от 55 до 70 дб. Это намного превышает шумы вакуумных триодов. Однако опыт

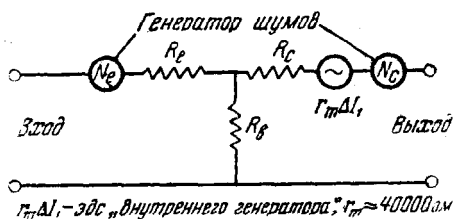


Рис. 9. Эквивалентная схема для оценки шумов.

борьбы с шумами в кристаллических детекторах, приведшей к хорошим результатам, заставляет думать, что шумы транзистора удастся подавить, приблизив его по качеству к электронным лампам. Интересно, что, как следует из кривой рис. 10, полученной Беккером, шумы транзистора сильно падают при переходе в область радиочастот.

6. О СХЕМАХ ВКЛЮЧЕНИЯ ТРАНЗИСТОРА. КРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ ТЕТРОД

На рис. 11 изображены три основные возможные схемы включения транзисторов. Рассмотренная выше схема А аналогична схеме включения триода с заземлённой сеткой^{23, 25}. Схема с заземлённым эмиттером аналогична включению триода с заземлённым катодом. Коллектор аналогичен аноду, и усилительный каскад

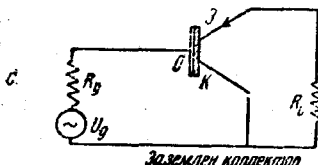
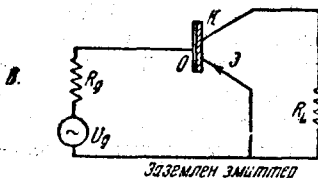
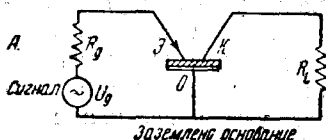


Рис. 11. Включение транзистора как усилительного элемента схемы.

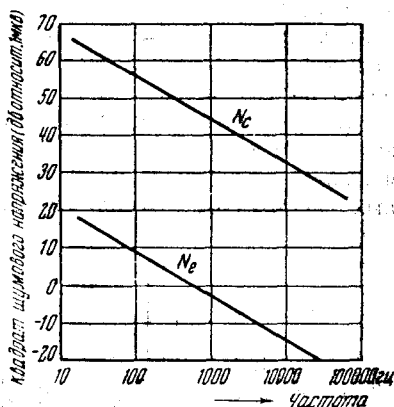


Рис. 10. Частотная зависимость уровня шума.

в отличие от схемы А меняет фазу сигнала на 180° . При малых значениях R_L схема может генерировать (обычно в области звуковых частот).

Схема с заземлённым коллектором может быть применена для усиления сигнала «в обе стороны», причём при усилении «слева направо» она не меняет фазу сигнала, а при работе «справа налево» меняет её на 180° . Усиление составляет около 15 дБ. Увеличение R_g ведёт к меньшей стабильности работы; увеличение R_L увеличивает стабильность.

Применение ряда транзисторов последовательными каскадами невыгодно, так как их выходной импеданс велик, а входной мал. Максимальное усиление на каскад ввиду этого не превы-

$$\begin{aligned} R_g &= 500 \text{ ом} \\ R_{вн} &= 2100 \text{ ом} \\ B_0 &= 24 \text{ дБ} \\ R_L &= 20000 \text{ ом} \\ R_{вых} &= 8900 \text{ ом} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_g &= 20000 \text{ ом} \\ R_{вн} &= 41000 \text{ ом} \\ B_0 &= 16 \text{ дБ} \\ R_L &= 10000 \text{ ом} \\ R_{вых} &= 7500 \text{ ом} \end{aligned}$$

шает 5 дБ. При согласовании сопротивлений межкаскадными трансформаторами, однако, оно может быть доведено до 15 дБ. Соединение в последовательную схему транзисторов с заземлёнными эмиттерами труднее из-за меньшей стабильности, но усиление на каскад может быть большим. Был построен усилитель, давший усиление 55 дБ на три каскада²³.

Кроме германиевых триодов, в настоящее время сконструирован также тетрод, имеющий три детекторных контакта. Два из них являются эмиттерами. Контакты расположены треугольником на равных расстояниях в 0,005 см друг от друга. Тетрод такого вида

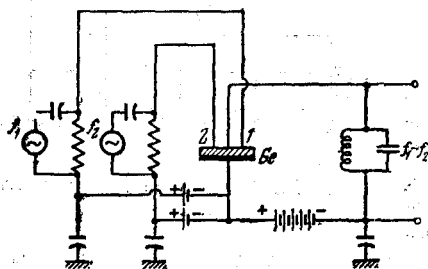


Рис. 12. Преобразователь частоты на германиевом триоде.

был успешно применён в схеме преобразования частоты (рис. 12). При этом выяснилось, что f_1 и f_2 можно доводить по крайней мере до 200 МГц с тем, чтобы промежуточная частота $f_1 - f_2$ лежала в рабочей области обычного транзистора, т. е. не превышала нескольких мегагерц²⁴.

Из-за сравнительно высокого уровня шумов применение кристаллических триодов для высококачественного

усиления звуковых частот пока затруднительно. Однако очевидные преимущества транзистора уже привлекли к нему внимание в специальных областях. Так, например, генератор звуковой частоты был применён в радиодальнометре ракеты²⁵, где кристаллический триод из-за малого габарита и механической стойкости был предпочтён вакуумной радиолампе. Вероятно, транзистор найдёт себе применение в первую очередь также, например, в счётных машинах, где применяются многие сотни усилительных единиц, и в коммутирующих телемеханических устройствах.

Продолжительность жизни транзистора по крайней мере того же порядка, что и у современных радиоламп. Механическая же прочность опытных серийных образцов, очевидно, выше, чем у вакуумных ламп. При электрической «формовке» коллектора происходит, по сути дела, точечная сварка, которая делает этот контакт очень устойчивым¹². Контакт эмиттера более нежен.

Заливание готового транзистора изолирующими аморфными «набивками» приводит к большей устойчивости. Имеются данные, что кристаллические триоды могут быть изготовлены и из кремния¹⁴.

7. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПРИНЦИПЕ РАБОТЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ТРИОДА

В настоящем разделе даётся количественная оценка ряда величин, связанных с действием транзистора, а именно:

- 1) полей, обусловленных в германии током коллектора;
- 2) времён переноса «дырок» от эмиттера к коллектору;
- 3) усиления тока в коллекторе;
- 4) сопротивления обратной связи.

Можно считать, что ток коллектора обусловлен главным образом электронами проводимости, растекающимися от точечного контакта радиально. Это предположение особенно близко к истине, если ток коллектора значительно сильнее тока эмиттера. Поле на расстоянии r от коллектора равно

$$E = \frac{\rho I_c}{2\pi r^2}. \quad (10)$$

Например, если $\rho = 10 \text{ ом см}$, $I_c = 0,001 \text{ а}$, $r = 0,005 \text{ см}$, $E \cong 100 \frac{\text{в}}{\text{см}}$. Скорость переноса «дырки» в поле E равна $\mu_h E$, где μ_h — подвижность «дырок».

Время переноса

$$T = \int_r^s \frac{dr}{\mu_h E} = \frac{2\pi}{\mu_h \rho I_c} \int_0^s r^2 dr, \quad (11)$$

где s — расстояние между коллектором и эмиттером. Интегрирование даёт

$$T = 2\pi s^3 \frac{1}{3\mu_h \rho I_c}. \quad (12)$$

Для $s = 0,005 \text{ см}$, $\mu_h = 1000 \frac{\text{см}^2}{\text{в сек}}$, $\rho = 10 \text{ ом см}$ и $I_c = 0,001 \text{ а}$ время переноса приблизительно равно $0,25 \cdot 10^{-7} \text{ сек}$. Это совпадает с выводами из изменения сдвига фазы с ростом частоты сигнала. Ток I_h на самом деле, конечно, несколько снижается рекомбинацией на пути от эмиттера к коллектору.

Рассмотрим теперь влияние пространственного заряда «дырок» на запирающий барьер у коллектора. Оценка концентрации дырок может быть получена следующим образом. Поле в запирающем барьере достигает величины $10^4 \frac{\text{в}}{\text{см}}$. Умножение на подвижность даёт скорость переноса «дырок» v_h около 10^7 см/сек . «Дырочный» ток I_h равен

$$I_h = n_h e v_h A_c, \quad (13)$$

где A_c — площадь контакта коллектора, а n_h — концентрация «дырок» в барьере.

Из последнего равенства эта концентрация может быть выражена как

$$n_h = \frac{I_h}{ev_h A_c}. \quad (14)$$

При $I_h = 0,001$ а, $v_h = 10^7$ см/сек и $A_c = 10^{-6}$ см n_h приближенно равно $0,6 \cdot 10^{18}$, что одного порядка величины с концентрацией «доноров» в барьере. Поэтому естественно считать, что «дырочный» ток может изменять пространственный заряд барьера, а следовательно, и поток электронов из коллектора в значительной степени. Именно этим эффектом, вероятно, объясняются значения α , большие 1.

Как было сказано ранее, ток коллектора оказывает на ток эмиттера влияние, носящее характер положительной обратной связи. Ток коллектора снижает потенциал поверхности вблизи эмиттера на величину

$$U = \frac{\rho I_c}{2\pi s}. \quad (15)$$

Сопротивление обратной связи, введенное в уравнение (3), выражается как

$$R_F = \frac{\rho}{2\pi s}, \quad (16)$$

При $\rho = 10$ ом·см и $s = 0,005$ см R_F оказывается равным 300 ом, что близко к наблюдаемым значениям.

Оценка величин, приведённых здесь, согласуется с общей физической картиной действия транзистора.

ЛИТЕРАТУРА

А. Основная

1. Bardeen а. Brattain, Phys. Rev. 74, 230 (1948).
2. Brattain а. Bardeen, Phys. Rev. 74, 231 (1948).
3. О. Лосев, Телеф. и Телегр. б. Пр., № 14, стр. 375 (1922).
4. О. Лосев, Телеф. и Телегр. б. Пр., № 53, 1929.
5. Г. Остроумов, Телеф. и Телегр. б. Пр., № 24, стр. 204 (1924).
6. Б. А. Доброхотов, Радиотехнические измерения на сантиметровых волнах, Изд. «Советское радио» (1948).
7. Б. И. Давыдов, УФН 33, 157 (1947).
8. Ф. Ф. Волькенштейн, УФН 28, 389 (1946).
9. Ф. Ф. Волькенштейн, Электропроводность полупроводников, Гостехиздат, 1947.
10. Вильсон, Квантовая теория металлов, Гос. изд-во техн.-теор. лит-ры, 1941.
11. Dunlap, General Electric Review 52, 9 (1949).
12. Torrey а. Whitmer, Crystal Rectifiers, Mac Graw Hill, 1948.
13. Lark-Horowitz и др., Phys. Rev. 69, 258 (1946).

14. Bardeen a. Brattain, Phys. Rev. 75, 1208 (1949).
15. Kock a. Wallace, Electrical Engineering 68, 222 (1949).
16. Bardeen, Phys. Rev. 71, 717 (1947).
17. Shive, Phys. Rev. 75, 689 (1949).
18. Haynes a. Shockley, Phys. Rev. 75, 691 (1949).
19. Bray, Lark-Horovitz a. Smith, Phys. Rev. 72, 530 (1948).
20. Bray, Phys. Rev. 74, 1218 (1948).
21. Ryder a. Shockley, Phys. Rev. 75, 310 (1949).
22. Becker a. Shive, Electrical Engineering 68, 215 (1949).
23. Electronics, Авг. 1949, стр. 120.
24. F. Lehan, Electronics, Авг. 1949, стр. 90.
25. Haegeler, Electronics, Окт. 1949, стр. 80.
26. Красильов, Вестник информации, Изд. «Советское радио», № 17 (61), 15 сент. 1949.

Б. Дополнительная литература и литература
по смежным вопросам

27. Isenberg, Russell and Grene, Phys. Rev. 74, 1235 (1948), «Измерение эффекта Холла в полупроводниках».
28. F. Seitz, Phys. Rev. 73, 549 (1948), «Длина свободного пробега в Si и Ge».
29. Conwell and Weisskopf, Phys. Rev. 69, 258 (1946), «Теория примесного рассеивания в полупроводниках».
30. Pearson and Bardeen, Phys. Rev. 73, 1265 (1948), «Электрические свойства чистого кремния и его сплавов».
31. Wireless World, окт. 1948, № 10, стр. 358, «Усилительный кристалл».
32. Power Generation 52, № 10, 83 (1948), «Транзистор—кристаллический триод».
33. Atkins, Radio and Television News, окт. 1948, стр. 39, «Усилительный кристалл».
34. Davis, Johnson, Lark-Horovitz and Siegel, Phys. Rev. 74, 1255 (1948), «Бомбардировка нейтронами германиевых полупроводников».
35. Electrical Times 114, 415 (1948), «Теория транзистора».
36. Le Duc, Radio-Craft, июль 1948, стр. 20, «Высоочастотные кристаллические диоды».
37. McQuay, Radio-Craft, июль 1948, стр. 20; август 1948, стр. 20, «Кристаллические детекторы».
38. Scaif and Ohl, Bell. System Techn. Journal 26, январь 1947, «Развитие кремниевых кристаллических детекторов для радиолокации».
39. McQuay, Radio-Craft, сентябрь 1948, стр. 26, «Кристаллические детекторы (III)».
40. Lark-Horovitz and Johnson, Phys. Rev. 69, 858 (1946), «Теория удельного сопротивления сплавов германия».
41. Johnson and Lark-Horovitz, Phys. Rev. 69, 259 (1946), «Теория термо-эдс в германии».
42. M. Telkes, J. Appl. Phys. 18, 1116 (1947), «Германиевые термопары».
43. Benzer, Phys. Rev. 72, 531 (1947), «Спонтанные электрические колебания в кристаллах германия».
44. Benzer, Phys. Rev. 73, 1256 (1948), «Фотоэлектрический эффект и его связь с выпрямлением контактом металл-полупроводник».
45. Brown, Phys. Rev. 73, 1257 (1948), «Соотношение температуры, давления и проводимости в полупроводниках».
46. Radio-Craft, сентябрь 1948, «Закат радиоламп».

47. Johnson and Lark-Horovitz, Phys. Rev. 73, 1257 (1948), «Теория эффектов Нернста и Эттингсхаузена в полупроводниках при высоких температурах».
48. Serin, Phys. Rev. 70 104 (1946), «Энергия примесных уровней полупроводников».
49. Benzer, Phys. Rev. 70, 105 (1946), «Фото-диффузные и фото-пиковые характеристики в германии».
50. Meyerhof, Phys. Rev. 70, 106 (1946), «Контактная разность потенциалов в кристаллических детекторах».
51. Benzer, Phys. Rev. 71, 141 (1947), «Контакт германий—германий».
52. Bray and Lark-Horovitz, Phys. Rev. 71, 141 (1947), «Фото-и термоэлектрические эффекты в Ge детекторах p -типа».
53. Pearson and Shockley, Phys. Rev. 71, 142 (1947), «Измерение эффекта Холла и удельного сопротивления Ge и Si в области температур 10—600° K».
54. Meyerhof, Phys. Rev. 71, 727 (1947), «Контактная разность потенциалов в кремниевых кристаллических детекторах».
55. Brattain and Shockley, Phys. Rev. 72, 346 (1947), «Плотность поверхностных состояний кремния, полученная из измерений контактных потенциалов».
56. Brattain, Phys. Rev. 72, 345 (1947), «Доказательство существования поверхностных состояний полупроводника из изменения контактного потенциала при освещении».
57. Estermann и др., Phys. Rev. 72, 530 (1947), «Удельное сопротивление и постоянная Холла образцов германия при низких температурах».
58. Estermann и др., Phys. Rev., 71, 484 (1947), «Удельное сопротивление германия при низких температурах и влияние примесей».
59. Goodman, Lawson and Shiff, Phys. Rev. 71, 191 (1947), «Термическая ионизация уровней примеси в полупроводниках».
60. Benzer, Phys. Rev. 72, 1267 (1947), «Избыточно-дефектные германиевые контакты».
61. Dunlap and Hennely, Phys. Rev. 74, 976 (1948), «Невыпрямляющий германий».
62. Lehoc, Phys. Rev. 75, 1100 (1949), «О дырочном токе в германиевом транзисторе».
63. Pearson, Phys. Rev. 76, 179 (1949), «Подвижность электронов и дырок в монокристалле германия».
64. Shockley and Pearson, Phys. Rev. 76, 180 (1949), «Течение тока через границу $n-p$ ».
65. Bray, Phys. Rev. 76, 458 (1949), «Вход электронов в германий типа p ».
66. Fen and Bray, Phys. Rev. 76, 458 (1949), «Запирающий слой в германии типа p ».
67. Pfäff and Scaff, Phys. Rev. 76, 459 (1949), «Транзистор из германия типа p ».
68. Pearson, Phys. Rev. 76, 459 (1949), «Электрические свойства границ кристаллических зёрен в германии».
69. Shockley, Pearson, Sparks and Brattain, Phys. Rev. 76, 459 (1949), «Изменение сопротивления германиевой нити впускном дырок проводимости».
70. Radiotechnik 25, 375 (1949), «Коаксиальный транзистор».
71. Shockley and Pearson, Phys. Rev. 74, 232 (1948), «Модуляция проводимости тонкой плёнки полупроводника поверхностным зарядом».
72. Reich, Rev. of Sci. Instr. 20, 586 (1946), «Триггерная схема с транзистором».

73. Brattain and Briggs, Phys. Rev. **75**, 1705 (1949), «Оптические константы германия в видимом и инфракрасном свете».
 74. Smith, Phys. Rev. **75**, 953 (1949), «Температурная зависимость работы выхода у полупроводников».
 75. Markham and Miller, Phys. Rev. **75**, 959 (1949), «Влияние состояния поверхности на температурные изменения работы выхода у полупроводников».
 76. Suhl and Shockley, Phys. Rev. **75**, 1617 (1949), «Концентрирование электронов и дырок магнитным полем».
 77. Webster и др., RCA Rev. **10**, № 1, 5 (1949), «Некоторые новые цепи для трёхполюсного кристаллического усилителя».
 78. Gray, Phys. Rev. **76**, 152 (1949), «Зависимость удельного сопротивления германия от электрического поля».
 79. Benzer, Phys. Rev. **76**, 150 (1949), «Холл-эффект в точечных контактах металл-полупроводник».
 80. Benzer, J. of Appl. Phys. **23**, 804 (1949), «Германиевые детекторы с высоким обратным напряжением».
 81. Pearson and Bardeen, Phys. Rev. **75**, 865 (1949), «Электрические свойства чистого кремния и сплавов кремния с бором и фосфором».
 82. Aisberg, Toute la Radio **16**, 218 (1949).
 83. Electronics Nov. 1949, стр. 120, «Усиление и преобразование частоты с помощью транзистора».
 84. Putley, Proc. Phys. Soc. **62**, 284 (1949), «О электропроводности германия».
 85. Lehovics, Electronics **22**, 89 (1949), «Методика испытания транзисторов».
 86. Electrical Engineering **63**, 937 (1949), «Фотоэффект в германии».
 87. Shockley, Pearson and Hagnes, Bell System Techn. Journal **28**, 344 (1949); «Впуск дырок проводимости в германий. Количественные данные и транзистор с нитью».
 88. Ryder D. Kischer, там же, стр. 367, «Некоторые перспективы схем с транзисторами».
 89. C. Herring, там же, стр. 401, «Теория переходных процессов при переносе «дырок» в избыточных полупроводниках».
 90. Bardeen, там же, стр. 428, «К теории импеданса контактных детекторов».
 91. Shockley, там же, стр. 435, «К теории границ $n-p$ в полупроводниках. Транзисторы с переходом $n-p$ ».
 92. Matt, PIEE **96**, 1, стр. 253 (1949), «Полупроводники и детекторы».
-